

Увеличение давления впрыска и улучшение качества распыла топлива на режимах холостого хода позволило интенсифицировать процесс сгорания, вследствие чего расход топлива снизился примерно на 2 кг/ч во всем диапазоне скоростной характеристики, уменьшились выбросы СО и значения оптической плотности дыма; на режимах частот 800...1000 мин⁻¹ оптическая плотность дыма снизилась в 8 раз (рис. 4).

По результатам проведенных исследований удельные выбросы токсичных компонентов продуктов сгорания, определенные на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла, составили (г/э.л.с.·ч):

$$g_{CO}=7,4;$$

$$g_{NOx}=13,4;$$

$$g_{CH}=1,5.$$

Оптическая плотность дыма ОГ на эксплуатационных режимах не превышает 34% ($K_d=0,96 \text{ м}^{-1}$).

Приведенные данные свидетельствуют о том, что двухтактный высокофорсированный дизельный двигатель ЗТД, предназначенный для военнотанковых и колесных машин, по токсичности и дымности выпускных газов находится на уровне требований, регламентируемых ОСТ 37.001.234-81 и ГОСТ 17.2.2.01-84.

Список литературы:

1. В.А. Лиханов, А.М. Сайкин, *Снижение токсичности автотракторных дизелей*, М., ВО "Агропроиздат", 1991 г. 2. И.В. Парсаданов, Г.В. Прудников, А.А. Коколев, *Влияние топливоподачи на токсичность выбросов отработавших газов автотракторного дизеля*, *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр. Гос.аэро-косм.ун-та, Харьков: ХАИ, 2000, вып.19., с.179-183.* 3. В.Е. Горбаневский, Ю.П. Долгополов и др. *Беспрецизионные клапанные форсунки*, Киев, "Вища школа", 1987 г.

УДК 530.17+536.7+541.8(11)

А.П. Кудряш, д-р техн. наук, К.Р. Умеренкова, инж., В.С. Маринин, д-р техн. наук, А.А. Кайдалов, инж.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

С целью экономии углеводородного топлива, а также для снижения вредных выбросов автотранспортными средствами в последние годы все больше внимания уделяется использованию альтернативных топлив (АТ) (природный газ, биогаз, шахтный метан, водород и др.). Кроме технических трудностей, имеются и до сих пор не решенные научные проблемы. К ним в первую очередь относится зависимость качества рабочего процесса (КПД) от теплофизических свойств используемых газообразных топлив.

До настоящего времени теплофизические свойства, прежде всего теплоемкость, аппроксимируются эмпирическими зависимостями на основе использования экспериментальных данных. В связи с тем, что рабочее тело в процессе смесеобразования и сгорания в двигателе проходят через широкий диапазон температур и давлений, весь диапазон параметров состояний приходится разбивать на несколько участков. На каждом из них теплофизические свойства описываются отличными друг от друга кривыми, что крайне неудобно для использования и приводит к существенным погрешностям. Поэтому назрела необходимость в разработке универсального метода определения теплофизических свойств АТ в широ-

ком диапазоне параметров, который позволил бы отказаться от использования эмпирических коэффициентов.

Начальным этапом расчетов теплофизических свойств N -компонентной смеси является определение ее плотности ρ (молярного объема v_m). При заданных температуре T , давлении p и наборе концентраций $\{x_\alpha\}$, $\alpha = 1, 2, \dots, N-1$ значения v_m определяются в однофазной области из уравнения

$$p_m(v_m, T, \{x_\alpha\}) - p = 0, \quad (1)$$

а в области двухфазных, например парожидкостных ($L-V$) равновесий, – из решения системы уравнений

$$\begin{cases} p_m(v_m^L, T, \{x_\alpha^L\}) - p = 0; \\ p_m(v_m^V, T, \{x_\alpha^V\}) - p = 0; \\ \mu_1(v_m^L, T, \{x_\alpha^L\}) - \mu_1(v_m^V, T, \{x_\alpha^V\}) = 0; \\ \dots \\ \mu_N(v_m^L, T, \{x_\alpha^L\}) - \mu_N(v_m^V, T, \{x_\alpha^V\}) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где давление p_m и химические потенциалы

компонентов $\mu_i, i=1, 2, \dots, N$ определены уравнениями модифицированной теории возмущений (МТВ) [1]. Система (2) является основной при решении задачи о фазовых равновесиях смеси. Для двухфазной N -компонентной закрытой системы молярные объемы сосуществующих фаз и их равновесные составы (по $N-1$ концентрации для L - и V -фаз) согласно правилу фаз однозначно определяются давлением и $N-2$ концентрациями компонентов в какой-либо из фаз. В частности, для бинарной системы составы полностью определяются значениями T, p . Для открытой системы составы фаз и газосодержание определяются значениями T, p и $N-1$ концентрациями $\{x_\alpha\}$ исходной (гомогенной) смеси, а уравнения (2) при этом дополняются уравнениями материального баланса для фаз системы и распределения компонентов смеси между фазами.

Рассмотрим N -компонентную смесь при заданных температуре T , давлении p и исходном составе $\{x_i^0\}$ (наборе исходных молярных концентраций). Для исходной смеси, очевидно,

$$\sum_{i=1}^N x_i^0 = 1. \quad (3)$$

Задача состоит в определении при данных T, p и $\{x_i^0\}$ фазового состояния (жидкость, газ или двухфазная система жидкость + пар), составов и термодинамических свойств сосуществующих фаз, которые образовались из исходной смеси. В однофазной области (жидкость, газ, флюидное состояние) определяются термодинамические свойства смеси исходного состава. При этом плотность определяется из равенства давления смеси заданному давлению. В двухфазной области равновесия жидкость-пар (L - V) необходимо вместе с плотностями L - и V -фаз определить составы $\{x_i^L\}, \{x_i^V\}$ этих фаз и газосодержание n^V (молярную долю паровой фазы в двухфазной смеси), т.е. всего $2N+3$ параметра. Таким образом, система уравнений, описывающая равновесие фаз, кроме очевидных условий равенства давлений в фазах заданному давлению, равенства химических потенциалов μ_i всех N компонентов L - и V -фаз и уравнений, аналогичных (3), для наборов $\{x_i^L\}$ и $\{x_i^V\}$, должна также содержать $N-1$ уравнение материального баланса [2], связывающих n^V и концентрации (в фазах и в исходной смеси):

$$n^V (x_i^V - x_i^L) = x_i^0 - x_i^L, i=1, \dots, N. \quad (4)$$

Дополняя такими уравнениями систему (2), получим формальную систему $2N+3$ уравнений для указанных выше параметров [1].

Существование постоянных связей (4) с дополнительными условиями (3) позволяет сократить число неизвестных параметров

$$x_i^V = [x_i^0 - (1 - n^V) x_i^L] / n^V, i=1, \dots, N. \quad (5)$$

В случаях $n^V = 0$ и $n^V = 1$ решения не рассматриваются. Таким образом, плотности и составы сосуществующих L - и V -фаз определяются из решения системы $N+3$ уравнений

$$\begin{cases} p(T, \rho^L, \{x_i^L\}) - p = 0; \\ p(T, \rho^V, \{x_i^V\}) - p = 0; \\ \mu_i(T, \rho^L, \{x_i^L\}) - \mu_i(T, \rho^V, \{x_i^V\}) = 0, i=1, \dots, N; \\ \sum_{i=1}^N x_i^L = \sum_{i=1}^N x_i^V \end{cases} \quad (6)$$

для $N+3$ параметров $(\rho^L, \rho^V, \{x_i^L\}, n^V)$ с дополнительным условием (3). В системе (6) символом x_i^V обозначают не дополнительные неизвестные, а вспомогательные выражения согласно (5). Из этих выражений и определяются (после решения рабочей системы) концентрации $\{x_i^V\}$, дополняя найденный набор $N+3$ параметров до полного $(2N+3)$ -набора.

При решении рабочей системы нелинейных уравнений (6) используется набор исходных данных: список компонентов смеси, концентрации компонентов смеси, температуры, давления. Задача определения плотности смеси решается последовательно – путем определения начальных значений параметров состояния смеси, идентификации фазовых состояний смеси и определения минимума функции шаговым методом. После определения составов фаз смеси и их плотностей свойства этих фаз определяются на основе выражений МТВ [1].

При решении системы уравнений (6) необходимо предварительно определить $\rho_{(0)}^L, \rho_{(0)}^V, x_{i(0)}^L, x_{i(0)}^V, n_{(0)}^V$ – начальные значения $2N+3$ параметров, разумно приближенные к решениям этой системы. Введем вспомогательные параметры – константы фазовых равновесий K_i :

$$K_i = x_i^V / x_i^L, i=1, \dots, N. \quad (7)$$

Тогда уравнения материального баланса (4) примут вид

$$x_i^L = x_i^0 / [1 + n^V (K_i - 1)], i=1, \dots, N \quad (8)$$

или, в альтернативной форме,

$$x_i^V = K_i x_i^L = K_i x_i^0 / [1 + n^V (K_i - 1)], i=1, \dots, N. \quad (9)$$

Подставив выражения (8) и (9) в последнее уравнение системы (6), получим:

$$f(n^V) \equiv \sum_{i=1}^N \frac{x_i^0 (K_i - 1)}{n^V (K_i - 1) + 1} = 0. \quad (10)$$

Если известен набор $\{K_i\}$, уравнение (10) однозначно определяет один параметр (n^V) и, кроме того, функция $f(n^V)$ является основной при идентификации фазовых состояний. Начальные прибли-

жения $\{K_{i(0)}\}$ для $\{K_i\}$ определяют согласно (10) начальное значение газосодержания $n_{(0)}^V$. В качестве таких приближений [2, 3] можно использовать простейшие выражения:

$$K_{i(0)} = p_i^s / p, \quad (11)$$

где p_i^s – давление насыщенного пара i -го компонента смеси.

Значения $\{p_i^s\}$ при заданной температуре T можно определить из решения системы уравнений для равновесия фаз (L – V) чистых компонентов. Однако поскольку некоторые из компонентов могут находиться в смесях при температурах выше своих индивидуальных критических температур, удобнее использовать для $p_i^s(T)$ аналитические выражения, например, достаточно простое и надежное уравнение Питцера в представлении Ли-Кеслера:

$$p_i^s = \begin{cases} P_{ci} \exp \left[A_s + B_s/T_{ri} + C \ln T_{ri} + D_s T_{ri}^6 + \right. \\ \left. + \omega_i (E_s + F_s/T_{ri} + G_s \ln T_{ri} + H_s T_{ri}^6) \right], & T_{ri} \leq 1; \\ P_{ci} [1 + (5,824 + 4,83 \omega_i) (T_{ri} - 1)], & T_{ri} > 1, \end{cases} \quad (12)$$

где $T_{ri} = T/T_{ci}$ – приведенная температура; T_{ci} – критическая температура i -го компонента; P_{ci} – критическое давление i -го компонента; коэффициенты A_s, \dots, H_s и ацентрические факторы компонентов ω_i приведены в работе [4].

В закритической области температур $T_r > 1$ нами применено линейное продолжение уравнения Питцера (последняя строка в (12)), дающее приемлемые результаты.

Выражения (11) и (12) определяют набор начальных значений констант фазовых равновесий $\{K_{i(0)}\}$. Далее последовательность определения начальных значений параметров состояния смеси такая:

1) определяется начальное значение газосодержания $n_{(0)}^V$ из решения уравнения (10) с использованием начальных значений констант ФР $\{K_{i(0)}\}$;

2) определяются начальные значения концентраций в L - и V -фазах $\{x_{i(0)}^L\}, \{x_{i(0)}^V\}$ по уравнениям (8) и (9) с использованием значений $n_{(0)}^V$ и $\{K_{i(0)}\}$;

3) определяются начальные значения плотностей L - и V -фаз $\rho_{(0)}^L, \rho_{(0)}^V$ из уравнений, аналогичных первым двум уравнениям системы (6):

$$p(T, \rho_{(0)}^L, \{x_{i(0)}^L\}) - p = 0; \quad (13)$$

$$p(T, \rho_{(0)}^V, \{x_{i(0)}^V\}) - p = 0 \quad (14)$$

с использованием начальных значений $\{x_{i(0)}^L\}, \{x_{i(0)}^V\}$.

При этом нулевым приближением $(\rho_{(0)}^L, \rho_{(0)}^V)$ для $\rho_{(0)}^L$ и $\rho_{(0)}^V$ в уравнениях (13) и (14) служат выражения, соответствующие: для жидкости – состоянию плотной упаковки, для пара – состоянию идеального газа.

После определения начальных значений параметров состояния смеси система нелинейных алгебраических уравнений (6) подготовлена к решению. Определение набора $2N+3$ параметров состояния двухфазной системы проводится модифицированным методом Ньютона. Решение, однако, существенно упрощается, если идентификация фазовых состояний (газ, жидкость, двухфазная система жидкость–пар) проводится уже на раннем этапе – совместно с определением начальных значений параметров состояния и дополняется верификацией после расчета фазовых равновесий.

Анализ функции $f(n^V)$, определенной согласно (10), показывает, что существование равновесия фаз соответствует изменению знака функции $f(n^V)$ в пределах отрезка $0 \leq n^V \leq 1$. В этом случае решается система (6). Если на этом отрезке знак $f(n^V)$ не меняется, т.е. условие $f(0) \cdot f(1) < 0$ не выполняется, то уравнение (10) не имеет там решения. Условие $f(0) \cdot f(1) \geq 0$ соответствует однофазной (гомогенной) области состояний; для жидкого состояния исходной смеси $\{x_i^0\}$ достаточным является условие $f(0) \leq 0$, для газообразного – условие $f(1) \geq 0$. В этих случаях решаются уравнения (13) и (14) для определения плотности исходной смеси в однофазной области с набором концентраций $\{x_i^0\}$. Знак $f(n^V)$ анализируется уже после определения набора начальных значений констант $\{K_{i(0)}\}$ и, соответственно, начальных значений функции $f(n^V)$ в точках 0 и 1: $f_{(0)}(0)$ и $f_{(0)}(1)$. В случае существования фазового равновесия после решения системы (6) указанная процедура повторяется на базе найденных наборов $\{x_i^L\}, \{x_i^V\}$ и, соответственно, $\{K_i\}$: анализируется знак произведения $f(0) \cdot f(1)$ и т.д.

Возможности метода МТВ по исследованию фазовых равновесий и теплофизических свойств, реализованного в виде компьютерных программ, демонстрируют результаты для бинарных и многокомпонентных смесей. Получен обширный комплекс результатов для фазовых диаграмм и наборов термодинамических свойств, хорошо согласующихся с экспериментом в пересекающихся диапазонах состояний и прогнозирующих эти данные в рабочих диапазонах метода:

1) жидкое состояние – давления от линий па-

рождикостного равновесия до 1000 МПа или до линий кристаллизации, температура от тройной точки до критической точки;

2) газообразное (флюидное) состояние – давления от 0 до 1000 МПа, температура до 5000 К или до температур термического разложения (пиролиза) компонентов.

Наиболее сложной для описания и сравнительно мало исследованной экспериментально является область жидкого состояния смесей, которой

уделялось основное внимание. В работе [5] изложены результаты, полученные для бинарных смесей. По изложенной выше методике нами получены также данные о термодинамических свойствах ряда многокомпонентных смесей: природного газа (ПГ), а также газового конденсата, биогаза, шахтного газа и др. В табл. 1 приведены свойства жидких многокомпонентных смесей, близких по составу к ПГ основных месторождений СНГ, в равновесии с паровой фазой (составы смесей даны в табл. 2).

Таблица 1. Термодинамические свойства ПГ-смесей в равновесии с паровой фазой

№ смеси	ρ_m ,	$-V^E$,	$-H_m$,	H^E ,	S_m ,	C_{pm} ,	$\alpha_m \cdot 10^3$,	$\beta_{Tm} \cdot 10^3$,
	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{см}^3}{\text{моль}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \times \text{К}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \times \text{К}}$	1/К	1/МПа
$T = 105 \text{ К}$								
CH ₄	431,37	–	308,60	–	4,729	3,254	2,882	1,976
1	446,75	0,221	306,06	31,90	4,709	3,122	2,861	1,900
2	446,76	0,218	313,43	26,96	4,692	3,080	2,811	1,838
3	451,20	0,237	305,28	42,49	4,689	3,085	2,854	1,882
4	449,37	0,250	306,96	36,64	4,696	3,093	2,845	1,875
5	451,19	0,233	312,59	37,49	4,673	3,044	2,804	1,821
6	449,35	0,245	314,27	31,57	4,680	3,053	2,796	1,814
7	453,80	0,266	306,18	47,20	4,676	3,056	2,838	1,858
8	453,76	0,259	313,44	42,06	4,660	3,017	2,789	1,799
9	449,78	0,262	308,51	36,36	4,693	3,082	2,837	1,861
10	454,22	0,278	307,71	46,89	4,674	3,045	2,830	1,844
11	452,37	0,290	309,39	41,00	4,681	3,054	2,822	1,837
12	456,79	0,304	308,60	51,49	4,661	3,081	2,814	1,821
$T = 112 \text{ К}$								
CH ₄	422,07	–	285,46	–	4,942	3,368	3,344	2,236
1	437,19	0,277	283,72	27,43	4,914	3,240	3,292	2,148
2	437,38	0,255	291,32	19,32	4,895	3,213	3,228	2,074
3	441,57	0,295	283,18	36,90	4,892	3,207	3,280	2,128
4	439,82	0,309	284,82	30,72	4,899	3,212	3,268	2,119
5	441,74	0,271	290,72	28,75	4,873	3,181	3,217	2,055
6	439,98	0,284	292,36	22,56	4,881	3,186	3,205	2,047
7	444,19	0,326	284,27	40,19	4,877	3,179	3,256	2,099
8	444,32	0,299	291,75	32,00	4,859	3,154	3,194	2,09
9	440,25	0,322	286,42	29,80	4,896	3,206	3,256	2,102
10	444,61	0,339	285,86	39,24	4,875	3,174	3,245	2,083
11	442,84	0,352	287,49	33,05	4,882	3,178	3,233	2,075
12	447,20	0,368	286,92	42,50	4,860	3,147	3,222	2,056
$T = 120 \text{ К}$								
CH ₄	410,27	–	257,62	–	5,181	3,573	3,769	2,619
1	425,23	0,470	256,87	18,00	5,145	3,435	3,688	2,515
2	425,66	0,370	264,64	10,48	5,124	3,419	3,609	2,422
3	429,54	0,491	256,58	26,78	5,121	3,404	3,673	2,491
4	427,90	0,507	258,21	20,05	5,128	3,406	3,656	2,479
5	429,94	0,388	264,29	19,24	5,100	3,388	3,594	2,399
6	428,29	0,404	265,91	12,56	5,108	3,390	3,578	2,388
7	432,19	0,527	257,91	28,85	5,104	3,375	3,641	2,455
8	432,56	0,421	265,55	21,35	5,084	3,360	3,564	2,366
9	428,34	0,522	259,83	18,77	5,125	3,403	3,641	2,459
10	432,63	0,542	259,52	27,54	5,101	3,373	3,626	2,435
11	430,98	0,558	261,13	20,84	5,109	3,375	3,610	2,424
12	434,25	0,576	260,81	29,64	5,085	3,345	3,596	2,401

В табл. 1 ρ_m – плотность, H_m – энтальпия, S_m – энтропия, C_{pm} – изобарная теплоемкость, α_m – коэффициент теплового расширения, β_m – коэффициент изотермического сжатия. Отметим, что средняя погрешность описания плотности АТ составляет, как и

для чистых компонентов, около 0,1 %. Аналогичные результаты (погрешности расчетов на уровне обычных экспериментальных ошибок) получены и для набора основных термодинамических характеристик.

Таблица 2. Составы ПГ-смесей

№ смеси	Мольные доли компонентов, %				
	C ₁	C ₂	C ₃	N ₂	CO ₂
1	95	3	–	2	–
2	95	4	–	1	–
3	94,5	3	–	2	0,5
4	94,5	3	0,5	2	–
5	94,5	4	–	1	0,5
6	94,5	4	0,5	1	–
7	94	3	0,5	2	0,5
8	94	4	0,5	1	0,5
9	94	4	–	2	–
10	93,5	4	–	2	0,5
11	93,5	4	0,5	2	–
12	93	4	0,5	2	0,5

Эти результаты показывают, что в целом описание свойств смесей может быть успешно проведено в рамках предложенного метода. По всему набору свойств этот метод имеет значительные преимущества перед существующими модельными и эмпирическими схемами. Это, в частности, минимальное число исходных данных, необходимое для расчетов; отсутствие подгоночных параметров и эмпирических корреляций; адекватность статистико-механической модели, лежащей в основе метода, и, тем самым, надежное определение термодинамических особенностей систем; применимость для обширного класса веществ и их смесей; работоспособность в широких областях состояний; погрешности расчетов на уровне экспериментальных ошибок.

Разработанный метод оперативного и надежного определения термодинамических свойств многокомпонентных смесей позволяет исключить проведение дорогостоящих и длительных экспериментальных исследований, что дает значительный экономический эффект. Оценки показали, что применение

данного метода как составной части программы расчета рабочего процесса двигателей, работающих на альтернативных топливах, позволяет на 4–5 % повысить точность расчетов основных характеристик, в частности КПД.

Список литературы:

1. Маринин В.С. Теплофизика альтернативных энергоносителей. - Харьков : Форт, 1999. - 212 с.
2. Гуревич Г.Р., Брусиловский А.И. Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей. - М.: Недра, 1984. - 264 с.
3. Уэйлес С. Фазовые равновесия в химической технологии: В 2-х ч. - М.: Мир, 1989. - 304 с. (ч.1), 360 с. (ч.2).
4. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. - Л.: Химия, 1982. - 592 с.
5. Кудряш А.П., Маринин В.С. Теплофизические свойства альтернативных энергоносителей // Пробл. машиностроения. - 1998. - Т. 1, № 1. - С. 132-138.